益生菌影响动物营养物质消化吸收及肝脏代谢的研究进展

徐　函　吴艳萍　梅小强　李卫芬*

（浙江大学动物科学学院饲料科学研究所，教育部动物分子营养学重点实验室，杭州 310058）

摘　要：益生菌是一种通过改善肠道微生态平衡从而对宿主机体健康有益的活性微生物，其作为一种饲料添加剂而被广泛应用于畜牧业中。益生菌不仅能促进消化道对营养物质的消化吸收从而提高动物的生产性能，还能调节机体的新陈代谢，有效预防代谢病。本文总结了近年来国内外有关益生菌影响动物营养物质消化吸收及肝脏代谢的研究进展，以期为益生菌在畜禽生产中的应用提供理论依据。

关键词：益生菌；肠道；肝脏；消化吸收；代谢

中图分类号：S816.7　　文献标识码：A　　文章编号：

肠道是食物消化和吸收的重要场所，其消化吸收功能直接决定了养分利用的效率，从而影响机体的生长，肠黏膜还作为机体重要屏障抵御微生物和有害物质的入侵。肝脏是动物代谢的中枢性器官，其代谢稳态被破坏后可导致代谢综合征的发生。益生菌是指一种通过提高肠道微生态平衡而对宿主机体有益的活性微生物饲料添加剂[1]，而常见的益生菌有植物乳杆菌、嗜热链球菌、屎肠球菌、双歧杆菌和枯草芽孢菌等[2]。益生菌作为微生态制剂已在畜禽、水产养殖中广泛应用，其促生长作用效果及相关机理渐渐成为近年来的研究热点。众多研究表明益生菌能提高畜禽生产性能，其促生长机理与改善肠道菌群的平衡和肠黏膜结构[3]、提高营养物质消化吸收和代谢[4]、增强肠黏膜免疫功能[5]、抑制病原菌感染以及维持肠道健康[6]等密切相关。本文总结了近年来益生菌影响动物营养物质消化吸收及肝脏代谢功能的相关研究进展。

1　益生菌对肠道营养物质消化吸收的影响

1.1　益生菌对肠道消化吸收酶的影响

小肠是营养物质消化吸收的主要场所，饲粮中营养物质包括碳水化合物、蛋白质、脂肪等进入肠道后在微生物和多种消化酶的作用下进行细胞外消化，消化终产物由肠上皮细胞上

收稿日期：2018–04–13

基金项目：国家自然科学基金资助（31672460；31472128）

作者简介：徐　函（1994－），女，安徽淮北人，硕士研究生，从事益生菌与动物肠道健康研究。E-mail：21617062@zju.edu.cn

*通信作者：李卫芬，教授，博士生导师，E-mail：　wfli@zju.edu.cn

的各种转运载体吸收进入血液[7]。营养物质的消化吸收不良会引起一系列疾病，如腹泻、便秘、腹部胀大或疼痛[8]。富集在小肠近端的菌群具有对胆汁酸与低 pH 的耐受能力，从而利用食物中的营养物质促进其消化吸收。有研究表明，肠道中的某些微生物因富含淀粉酶、蛋白酶等基因从而可分解碳水化合物与蛋白质[9]。众多研究表明，给不同动物饲喂益生菌均可显著提高结肠与盲肠中双歧杆菌属、乳杆菌属和链球菌属的数量[10-11]。因此，益生菌可通过改善肠道菌群结构促进营养物质的消化。另外，在饲粮中添加益生菌可提高动物肠道内容物中消化酶活性，包括水产动物[12]、禽类[13]和猪[14]。黄其永[14]研究发现哺乳仔猪胰消化酶活性随着日龄的增加而呈上升趋势，并证实了德氏乳杆菌(活菌数≥5×10^8 CFU/mL)能够调节胰腺脂肪酶和蛋白酶 mRNA 表达，进而促进消化酶的合成与分泌，使动物采食量增加，说明益生菌能够通过调节酶基因转录水平或消化酶活性来促进动物对营养物质的消化。

养分吸收过程是食物的消化产物、水和电解质等通过消化管黏膜上皮细胞进入血液和淋巴的过程。在消化道各段，食管没有吸收功能，胃黏膜仅能吸收酒精和少量的水分，大肠一般也只能吸收水分和无机盐。因此，小肠是养分吸收的主要场所。小肠上皮细胞吸收转运营养物质的机制共有 4 种：被动转运、膜转运、载体偶联转运和细胞旁路通路转运[15-16]。多糖和寡糖需先在消化酶的作用下形成二糖，再经二糖酶(乳糖酶、蔗糖酶和麦芽糖酶)分解成单糖后才能被吸收[17]。益生菌可增加肠黏膜中消化吸收相关酶活性。饲粮中添加芽孢杆菌和乳酸杆菌（6×10^6 CFU/g）均有效缓解脂多糖（LPS）刺激导致的仔猪空肠乳糖酶活性的降低和回肠蔗糖酶活性的升高[18]。Dubey 等[19]研究发现，氧化偶氮甲烷处理小鼠 2 周导致其中毒后，口服益生菌 GS4（1.1×10^9 CFU/mL）可以显著缓解中毒导致的肠黏膜蔗糖酶和乳糖酶活性的降低，并修复肠绒毛刷状缘结构。Barrenetxe 等[20]研究表明，饲喂干酪乳杆菌和双歧杆菌（10^8 CFU/mL）均显著提高了小鼠麦芽糖酶、蔗糖酶和氨基肽酶 N 的活性，增加肠上皮对单糖和小肽的吸收。

脂肪的吸收过程与糖和蛋白质的吸收有着较大差异，其在脂肪酶作用下可形成脂肪酸和3-磷酸甘油酯，与胆盐作用后形成混合微胶粒，然后以弥散方式通过微绒毛间隙进入吸收细胞，最后形成乳糜微粒经淋巴管输送到机体[21]。关于益生菌对脂肪吸收的影响研究鲜有报道，但 Ueda 等[22]通过检测血清甘油三酯含量发现，口服乳酸片球菌均降低了甘油三酯的水平，这与 Wang 等[23]的研究结果一致，说明益生菌具有减少脂肪积累的作用效果，潜在的机制可能是由于乳酸片球菌抑制了肠道对脂肪的吸收，或增强了脂肪分解的通路。

其他诸如碱性磷酸酶（AKP）、Na^+/K^+-ATP 酶和γ-谷氨酰转肽酶（γ-GT）等也参与营养物质吸收和转运。其中，AKP 在维持肠内稳态、屏障功能和保护宿主健康方面起关键作用，

饲粮和肠道微生物均能够影响 *AKP* 的表达及其活性[24]。Na^+/K^+-ATP 酶对于维持 Na^+依赖性转运载体如钠葡萄糖共转运载体 1（SGLT1）介导的葡萄糖转运尤为重要。γ-GT 主要参与细胞中氨基酸和小肽的摄取和转运[25]。饲粮中添加芽孢杆菌或乳酸杆菌可改善 LPS 刺激导致的十二指肠和空肠黏膜 AKP 活性的降低[18]，有效缓解肠道损伤，改善肠道健康；饲粮中添加益生菌可提高肉鸡回肠黏膜 Na^+/K^+-ATP 酶 mRNA 表达量[26]和空肠、回肠γ-GT 活性[27]，进一步说明益生菌促进肠道对小肽的吸收。

1.2　益生菌对肠道吸收转运载体的影响

以上被消化分解成的小分子营养物质需被肠道及其他组织中相应的转运载体转运到细胞内后才能被机体利用。在肠道中，转运载体主要有小肽转运载体[寡肽转运蛋白 1（PepT1）]、氨基酸转运载体[*L* 型氨基酸转运载体 1（LAT1）、丙氨酸/丝氨酸/半胱氨酸/苏氨酸转运载体 1（ASCT1）、中性氨基酸转运载体 1（B^0AT1）和兴奋性氨基酸转运载体 1（EAAC1）等]以及葡萄糖转运载体[SGLT1 和葡萄糖转运载体 2（GLUT2）等][28]。有研究表明，益生菌可促进以上转运载体的表达，如枯草芽孢杆菌显著提高肉鸡回肠黏膜中 *PepT*1 mRNA 表达量[26]，复合乳杆菌制剂（添加量为 0.1%）能显著提高热应激肉鸡小肠内钠葡萄糖共转运载体 4（*SGLT*4）及正常条件下 *GLUT*2、葡萄糖转运载体 5（*GLUT*5）和 *SGLT*4 基因表达量[29]。另有研究发现，大肠杆菌 K88 可使猪肠上皮细胞葡萄糖转运载体 *SGLT*1、氨基酸转运载体 y^+*LAT*1、碱性氨基酸转运载体 1（*CAT*1）和丙氨酸/丝氨酸/半胱氨酸/苏氨酸转运载体 2（*ASCT*2）mRNA 的表达显著下调，而饲喂 1×10^8 CFU 的植物乳杆菌能显著抑制这一现象[30]。以上研究均表明益生菌可通过提高转运载体的表达促进营养物质转运。

1.3　益生菌对肠上皮结构的影响

肠道所含有的巨大表面积不断受到来自饮食的某些抗原和微生物的攻击，并且它是抵抗这种侵略的第一道防线，肠道形态结构的完整不仅是维持肠黏膜屏障功能的形态学基础，更是肠道发挥正常功能的必备条件。肠黏膜细胞在不断更新的同时伴随着细胞的增殖与凋亡属于机体正常现象[31]。但是，异常的细胞凋亡则会使肠道功能失调，进而出现肠壁坏死、肠腔出血等疾病[32]。近年来的研究都发现，益生菌不仅缓解外界刺激导致的肠道细胞凋亡，还促进了肠癌细胞的凋亡。如丁酸梭菌（1×10^8 CFU/mL）通过下调细胞凋亡因子或凋亡蛋白 caspase-3 的基因表达，显著抑制大肠杆菌诱导的鸡胚肠道细胞凋亡[33]，罗伊氏乳杆菌通过下调 caspase-3 的蛋白表达显著缓解 LPS 导致的肠道细胞凋亡[34]；乳酸菌与人结肠癌细胞 HT-29 共培养后发现促凋亡蛋白——B 淋巴细胞瘤-2（Bcl-2）相关 X 蛋白（Bax）与凋亡抑制因子 Bcl-2 蛋白表达量比值大于 1，表明乳酸菌可促进 HT-29 细胞凋亡[35]，另有试验发现

乳酸菌还能促进 Caco-2 细胞凋亡[36]，这提示益生菌可通过调节细胞凋亡来维护肠道结构的完整性，恢复肠道正常生理功能。

肠道屏障的另一个重要组成是细胞间的连接复合体——紧密连接。它是由跨膜蛋白组成的多蛋白复合体，封住相邻上皮细胞间的空隙，并存在于顶膜附近，例如闭合蛋白 claudin、occludin 及其家族，胞质骨架蛋白如闭锁小带蛋白 ZO-1 等[37]。肉鸡饲养试验发现，酵母菌和芽孢杆菌（1×10^9 CFU/kg）均使 occludin、claudin 的 mRNA 表达量提高[38]，这与 Eun 等[39]和 Endo 等[40]的研究结果一致。另有研究发现，无论是经热应激、病原菌处理还是正常肉鸡，在饲粮中添加益生菌不仅缓解了应激导致的绒毛高度降低、隐窝深度的增加、绒隐比的减少、肠上皮电阻的下降等，还使正常组的盲肠绒毛高度和隐窝深度增加[41-43]。此外，二胺氧化酶（DAO）是一种细胞内酶，主要存在于小肠黏膜的上层绒毛中。肠黏膜和血浆 DAO 活性是反映肠黏膜上皮细胞结构修复和损伤及其通透性的重要标志[44]。窦茂鑫[18]研究发现，经过 LPS 刺激的仔猪血浆 DAO 活性升高，而肠黏膜 DAO 活性降低，表明小肠黏膜细胞受损，通透性增加，饲粮中添加芽孢杆菌制剂和乳酸杆菌制剂均使得肠黏膜和血浆中 DAO 活性降低，表明益生菌可以缓解 LPS 刺激引起的肠黏膜损伤，维护肠道功能的完整性。然而，也有报道表明益生菌对肠道形态的作用并不明显[45-46]。

2　益生菌对肝脏代谢的作用

肝脏是人体代谢的中枢性器官，经肠道吸收后的营养物质经肝脏分解代谢后转运至各个靶器官和组织，以供吸收利用，从而促进机体的生长发育。肝脏对于糖代谢、脂代谢、氨基酸代谢稳态的维持起到了主要的作用。肝脏中的糖原代谢酶能够使肝脏感知到血糖的含量从而储存或动员糖原以达到外周血的需要，机体内糖代谢途径主要有糖酵解、糖异生和磷酸戊糖途径，在此过程中，磷酸果糖激酶、丙酮酸激酶、葡萄糖-6-磷酸酶等是极其重要的代谢酶[47]。而存在于肝脏的氨基酸代谢酶如谷草转氨酶、谷丙转氨酶和乳酸脱氢酶在肝脏中的活性较高，是反映肝功能的重要指标[48]。此外，在脂肪合成与脂肪酸氧化过程中，脂肪合成酶、肉毒碱棕榈酰转移酶 1 和乙酰辅酶 A 羧化酶是其关键酶[49]。

肝脏蛋白质组学分析表明，屎肠球菌（活菌数>10^6 CFU/g）上调了肉仔鸡中肝脏氨基酸代谢相关蛋白——甜菜碱高半胱氨酸甲基转移酶（BHMT）、胱硫醚-γ-裂解酶（CTH）和谷草转氨酶 1（GOT1）的蛋白表达，表明屎肠球菌增强了肉仔鸡氨基酸代谢的速率，为蛋白质的合成提供了大量的原料[50]。益生菌混合制剂（植物乳杆菌和弯曲乳杆菌）或单独使用能降低饲喂高脂高胆固醇饲粮小鼠的肝脏脂肪合成过程的相关酶及其基因的表达[51]；在给小鼠及 SD 大鼠饲喂高糖饲粮时，鼠李糖乳杆菌或格式乳杆菌与高糖饲粮混合组显著增加

高糖饲粮饲喂小鼠或SD大鼠脂肪酸氧化相关酶的基因表达量，显著降低脂肪合成相关酶乙酰辅酶A羧化酶的基因表达[52-53]，说明益生菌可以减少肝脏脂肪积累。还有研究发现，一种从黏液层中分离的益生菌能够降低饲喂高脂饲粮小鼠肝脏中葡萄糖-6-磷酸酶基因的表达，增加脂肪酸氧化相关酶基因的表达，从而减少糖异生作用，控制脂肪沉积，缓解高脂日粮引起的高血糖症，维持糖代谢稳态[54]。

机体糖代谢主要涉及糖的消化吸收、葡萄糖的摄取及分解、糖原的合成与分解以及糖异生等环节[55]。血液中甘油三酯、总胆固醇和游离脂肪酸等脂类物质是动物机体脂类物质代谢水平的重要指标。此外，胆碱酯酶是反映肝脏合成功能的一类水解酶，胆碱酯酶活性升高可能意味着脂肪肝及脂肪性肝炎性疾病的发生。有研究发现，添加乳酸杆菌（活菌数>1×10^6 CFU/g）使肉鸡胆碱酯酶活性极显著降低，肌酸激酶、脂肪酶和乳酸脱氢酶显著提高，甘油三酯和总胆固醇含量有所降低，表明益生菌改善了机体脂类代谢[56]。饲粮中添加约1×10^8 CFU/g的益生菌（枯草芽孢杆菌和乳酸杆菌）使正常蛋白试验组青脚麻鸡血清中甘油三酯水平下降、高密度脂蛋白和胆固醇水平上升，说明益生菌有一定的降脂作用[57]。陈丽艳[58]研究发现，饲粮中添加一定水平的乳酸杆菌制剂可提高肉仔鸡血清中总蛋白（TP）含量，降低非蛋白氮含量，说明乳酸杆菌可显著提高肉仔鸡蛋白质沉积。崔艳红等[59]报道饲喂益生菌复合发酵料显著提高了仔猪血清中葡萄糖和TP含量，显著降低血清尿素氮水平。张勇[60]在大鼠试验证明了提前摄入4×10^9 CFU/mL的益生菌——干酪乳杆菌Zhang（*L. casei* Zhang）能预防高果糖水诱导产生的高胰岛素血症，持续饲喂4周能改善其高胰岛素水平。血清谷草转氨酶和谷丙转氨酶（GPT）是氨基酸代谢转化过程中重要的酶，也是检验肝脏功能的一个重要指标[61]。丁酸梭菌可以显著缓解大鼠非酒精性脂肪肝引起的GPT的升高[40]，一定程度上降低了肝脏损伤。以上结果表明，益生菌能促进脂肪和糖代谢、提高蛋白质的沉积、缓解肝脏损伤，具体机制可能是益生菌先作用于肠道菌群，改变了细菌分泌酶的活性表达，并参与了碳水化合物等代谢的信号通路[62-63]。

3 小 结

畜禽对饲料的消化吸收能力是提高其生长和生产性能的关键因素，同时肝脏代谢情况是维持机体稳态的重要基础。研究已表明，益生菌可以改善肠道形态、恢复肠道正常功能、提高肠道消化吸收酶的活性、缓解应激导致的肠黏膜和肝脏的损伤。通过益生菌治疗能够降低某些疾病发生的风险，但是益生菌对消化和代谢系统的作用效果仍然缺乏很多有根据的生物指标，如益生菌和肠道菌群的互作与消化吸收之间的联系，肝脏代谢的相关信号通路研究还有待进一步深入。

参考文献：

[1] FULLER R.Probiotics in man and animals[J].Journal of Applied Microbiology,1989,66(5):365–378.

[2] 李军训,罗学刚,高洁,等.益生菌的分类、生理功能与有效性评价研究进展[J].中国农业科技导报,2010,12(6):49–55.

[3] PIRARAT N,PINPIMAI K,RODKHUM C,et al.Viability and morphological evaluation of alginate-encapsulated *Lactobacillus rhamnosus* GG under simulated tilapia gastrointestinal conditions and its effect on growth performance,intestinal morphology and protection against *Streptococcus agalactiae*[J].Animal Feed Science and Technology,2015,207:93–103.

[4] 孙建然,惠灿灿,邓大同,等.肠道菌群与 2 型糖尿病及益生菌关系的研究进展[J].安徽医药,2016,20(4):631–634.

[5] LIU H Y,ROOS S,JONSSON H,et al.Effects of *Lactobacillus johnsonii* and *Lactobacillus reuteri* on gut barrier function and heat shock proteins in intestinal porcine epithelial cells[J].Physiological Reports,2015,3(4):12355.

[6] WU Y P,ZHU C,CHEN Z,et al.Protective effects of *Lactobacillus plantarum* on epithelial barrier disruption caused by enterotoxigenic *Escherichia coli* in intestinal porcine epithelial cells[J].Veterinary Immunology and Immunopathology,2016,172:55–63.

[7] 王晓平.酶与消化吸收[J].玉林师专学报,1997,18(3):78–81.

[8] SOMMER F,BÄCKHED F.Know your neighbor:microbiota and host epithelial cells interact locally to control intestinal function and physiology[J].Bioessays,2016,38(5):455–464.

[9] ARUMUGAM M,RAES J,PELLETIER E,et al.Enterotypes of the human gut microbiome[J].Nature,2011,473(7346):174–180.

[10] 行浩.饲粮中添加益生菌对蛋鸡早期生长、养分利用及肠道菌群的影响[D].硕士学位论文.扬州:扬州大学,2016.

[11] BEILHARZ J E,KAAKOUSH N O,MANIAM J,et al.Cafeteria diet and probiotic therapy:cross talk among memory,neuroplasticity,serotonin receptors and gut microbiota in the rat[J].Molecular Psychiatry,2018,23(2):351–361.

[12] WANG J H,ZHAO L Q,LIU J F,et al.Effect of potential probiotic *Rhodotorula benthica* D30 on the growth performance,digestive enzyme activity and immunity in juvenile sea cucumber

Apostichopus japonicus[J].Fish & Shellfish Immunology,2015,43(2):330–336.

[13] 段颖,赵玉鑫,潘翠玲,等.富硒益生菌对蛋鸡抗氧化能力和肠道菌群及消化酶活性的影响[J].南京农业大学学报,2010,33(2):68–72.

[14] 黄其永.德氏乳杆菌对哺乳仔猪消化器官及消化酶活性的影响研究[D].硕士学位论文.长沙湖南农业大学,2013.

[15] ALBERSEN M,BOSMA M,KNOERS N V V A,et al.The intestine plays a substantial role in human vitamin B6 metabolism:a Caco-2 cell model[J].PLoS One,2013,8(1):e54113.

[16] AWAD W A,GHAREEB K,PABLACK N,et al.Dietary inulin alters the intestinal absorptive and barrier function of piglet intestine after weaning[J].Research in Veterinary Science,2013,95(1):249–254.

[17] 许梓荣,李卫芬,孙建义.猪胃肠道黏膜二糖酶的性质[J].动物学报,2002,48(2):202–207.

[18] 窦茂鑫.不同类型益生菌制剂对脂多糖刺激仔猪肠道吸收和屏障功能的影响[D].硕士学位论文.武汉:武汉轻工大学,2013.

[19] DUBEY V,GHOSH A R,BISHAYEE K,et al.Probiotic *Pediococcus pentosaceus* strain GS4 alleviates azoxymethane-induced toxicity in mice[J].Nutrition Research,2015,35(10):921–929.

[20] BARRENETXE J,ARANGUREN P,SANTIDRIAN S,et al.Effects of *Lactobacillus casei* and *Bifidobacterium bifidum* on intestinal enzymatic activity and sugar uptake[J].The FASEB Journal,2006,20(5):A1018–A1018.

[21] 细田四郎,穆文广.脂肪的消化和吸收[J].日本医学介绍,1989(9):388–389.

[22] UEDA T,TATEGAKI A,HAMADA K,et al.Effects of *Pediococcus acidilactici* R037 on serum triglyceride levels in mice and rats after oral administration[J].Journal of Nutritional Science and Vitaminology,2018,64(1):41–47.

[23] WANG H S,NI X Q,QING X D,et al.Live probiotic *Lactobacillus johnsonii* BS15 promotes growth performance and lowers fat deposition by improving lipid metabolism,intestinal development,and gut microflora in broilers[J].Frontiers in Microbiology,2017,8:1073.

[24] ESTAKI M,DECOFFE D,GIBSON D L.Interplay between intestinal alkaline phosphatase,diet,gut microbes and immunity[J].World Journal of Gastroenterology,2014,20(42):15650–15656.

[25] 李鹏鹏.γ-谷氨酰胺转移酶与血压正常不稳定型心绞痛血管病变的互联研究[D].硕士学

位论文.长春:吉林大学,2013.

[26] FERNANDEZ A M F,SOUZA F A,SQUASSONI G H,et al.Replacement of antibiotic growth promoter by probiotic in the diet increases intestinal peptide transporter RNA expression in broilers[C]//Plant & Animal Genome ⅩⅫ Conference.San Diego:Plant and Animal Genome,2014.

[27] RAJPUT I R,LI Y L,XU X,et al.Supplementary effects of Saccharomyces boulardii and Bacillus subtilis B10 on digestive enzyme activities,antioxidation capacity and blood homeostasis in broiler[J].International Journal of Agriculture & Biology,2013,15(2):231–237.

[28] 周玲,王晓清,刘臻,等.营养素转运载体的研究进展[J].饲料研究,2013(4):18–23.

[29] FASELEH J M,WESAM A Y,SHOKRYAZDAN P,et al.Dietary supplementation of a mixture of *Lactobacillus strains* enhances performance of broiler chickens raised under heat stress conditions[J].International Journal of Biometeorology,2016,60(7):1099–1110.

[30] 吴云鹏.植物乳杆菌调节猪肠上皮细胞屏障功能和转运载体的研究[D].博士学位论文.广州:华南农业大学,2016.

[31] BERNSTEIN H,HOLUBEC H,WARNEKE J A,et al.Patchy field defects of apoptosis resistance and dedifferentiation in flat mucosa of colon resections from colon cancer patients[J].Annals of Surgical Oncology,2002,9(5):505–517.

[32] SHAH K A,SHUREY S,GREEN C J.Apoptosis after intestinal ischemia-reperfusion injury:a morphological study[J].Transplantation,1997,64(10):1393–1397.

[33] 高权新.丁酸梭菌与肠道上皮细胞互作的分子机制的研究[D].博士学位论文.杭州:浙江大学,2012.

[34] CUI Y J,LIU L,DOU X X,et al.*Lactobacillus reuteri* ZJ617 maintains intestinal integrity via regulating tight junction,autophagy and apoptosis in mice challenged with lipopolysaccharide[J].Oncotarget,2017,8(44):77489–77499.

[35] CHEN Z Y,HSIEH Y M,HUANG C C,et al.Inhibitory effects of probiotic *Lactobacillus* on the growth of human colonic carcinoma cell line HT-29[J].Molecules,2017,22(1):107.

[36] SOLTAN D M M,MOJARRAD M,BAGHBANI F,et al.Effects of probiotic *Lactobacillus acidophilus* and *Lactobacillus casei* on colorectal tumor cells activity (Caco-2)[J].Archives of Iranian Medicine,2015,18(3):167–172.

[37] ULLUWISHEWA D,ANDERSON R C,MCNABB W C,et al.Regulation of tight junction

permeability by intestinal bacteria and dietary components[J].The Journal of Nutrition,2011,141(5):769–776.

[38] RAJPUT I R,LI L Y,XIN X,et al.Effect of *Saccharomyces boulardii* and *Bacillus subtilis* B10 on intestinal ultrastructure modulation and mucosal immunity development mechanism in broiler chickens[J].Poultry Science,2013,92(4):956–965.

[39] EUN C S,KIM Y S,HAN D S,et al.*Lactobacillus casei* prevents impaired barrier function in intestinal epithelial cells[J].Apmis,2011,119(1):49–56.

[40] ENDO H,NIIOKA M,KOBAYASHI N,et al.Butyrate-producing probiotics reduce nonalcoholic fatty liver disease progression in rats:new insight into the probiotics for the gut-liver axis[J].PLoS One,2013,8(5):e63388.

[41] SONG J,XIAO K,KE Y L,et al.Effect of a probiotic mixture on intestinal microflora,morphology,and barrier integrity of broilers subjected to heat stress[J].Poultry Science,2014,93(3):581–588.

[42] CAO G T,ZENG X F,CHEN A G,et al.Effects of a probiotic,*Enterococcus faecium*,on growth performance,intestinal morphology,immune response,and cecal microflora in broiler chickens challenged with *Escherichia coli* K88[J].Poultry Science,2013,92(11):2949–2955.

[43] TSIRTSIKOS P,FEGEROS K,BALASKAS C,et al.Dietary probiotic inclusion level modulates intestinal mucin composition and mucosal morphology in broilers[J].Poultry Science,2012,91(8):1860–1868.

[44] LUK G D,BAYLESS T M,BAYLIN S B.Plasma postheparin diamine oxidase.Sensitive provocative test for quantitating length of acute intestinal mucosal injury in the rat[J].Journal of Clinical Investigation,1983,71(5):1308–1315.

[45] SALEHIMANESH A,MOHAMMADI M,ROOSTAEI - ALI MEHR M.Effect of dietary probiotic,prebiotic and synbiotic supplementation on performance,immune responses,intestinal morphology and bacterial populations in broilers[J].Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition,2016,100(4):694–700.

[46] ABUDABOS A M,ALYEMNI A H,AL MARSHAD B A.*Bacillus subtilis* PB6 based-probiotic (CloSTAT) improves intestinal morphological and microbiological status of broiler chickens under clostridium perfringens challenge[J].International Journal of Agriculture & Biology,2013,15(5):978–982.

[47] 黄岩,李建,王学习,等.饲料中不同蛋白质和淀粉水平对斜带石斑鱼生长性能和肝脏相关代谢酶活性的影响[J].水产学报,2017,41(5):746–756.

[48] 张相鑫,陈澄,唐志如,等.饲粮粗蛋白质水平对断奶仔猪肝脏氨基酸代谢酶活性及转运载体 mRNA 表达的影响[J].动物营养学报,2018,30(4):1431–1439.

[49] HIJMANS B S,GREFHORST A,OOSTERVEER M H,et al.Zonation of glucose and fatty acid metabolism in the liver:mechanism and metabolic consequences[J].Biochimie,2014,96:121–129.

[50] 罗建杰.日粮添加不同益生菌对肉仔鸡益生作用分子机制研究[D].硕士学位论文.北京:中国农业科学院,2013.

[51] YOO S R,KIM Y J,PARK D Y,et al.Probiotics *L. plantarum* and *L. curvatus* in combination alter hepatic lipid metabolism and suppress diet - induced obesity[J].Obesity,2013,21(12):2571–2578.

[52] KANG J H,YUN S I,PARK M H,et al.Anti-obesity effect of *Lactobacillus gasseri* BNR17 in high-sucrose diet-induced obese mice[J].PLoS One,2013,8(1):e54617.

[53] RITZE Y,BÁRDOS G,CLAUS A,et al.*Lactobacillus rhamnosus* GG protects against non-alcoholic fatty liver disease in mice[J].PLoS One,2014,9(1):e80169.

[54] EVERARD A,BELZER C,GEURTS L,et al.Cross-talk between *Akkermansia muciniphila* and intestinal epithelium controls diet-induced obesity[J].Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2013,110(22):9066–9071.

[55] 游玉明.花椒麻味物质对大鼠糖脂代谢的影响及其分子机制的研究[D].博士学位论文.重庆:西南大学,2016.

[56] 毛贵林.乳酸杆菌对仔鸡营养物质代谢与肌肉成分的影响[D].硕士学位论文.南昌:江西农业大学,2016.

[57] 奚雨萌,吴凡,杨榛,等.益生菌及有机酸复合制剂对青脚麻鸡生长性能、屠宰性能、肉品质及消化代谢的影响[J].中国家禽,2014,36(24):30–37.

[58] 陈丽艳.乳酸杆菌制剂对肉仔鸡脂肪和蛋白质代谢的影响[J].黑龙江畜牧兽医,2007(1):47–48.

[59] 崔艳红,韩庆功,崔艺佳,等.益生菌复合发酵料对断奶仔猪消化环境、血清生化指标和代谢激素水平的影响[J].西北农业学报,2018,27(1):16–23.

[60] 张勇.益生菌 *Lactobacillus casei* Zhang 对大鼠糖耐量受损改善作用和II型糖尿病预防作

用[D].博士学位论文.呼和浩特:内蒙古农业大学,2013.

[61] SOHAIL M U,RAHMAN Z U,IJAZ A,et al.Single or combined effects of mannan-oligosaccharides and probiotic supplements on the total oxidants,total antioxidants,enzymatic antioxidants,liver enzymes,and serum trace minerals in cyclic heat-stressed broilers[J].Poultry Science,2011,90(11):2573–2577.

[62] McNulty N P,Yatsunenko T,Hsiao A,et al.The impact of a consortium of fermented milk strains on the gut microbiome of gnotobiotic mice and monozygotic twins[J].Science Translational Medicine,2011,3(106):106ra106.

[63] VEIGA P,PONS N,AGRAWAL A,et al.Changes of the human gut microbiome induced by a fermented milk product[J].Scientific Reports,2014,4:6328.

Research Progress of Probiotics Effects on Animal Digestion, Absorption and Liver Metabolism of Nutrients

XU Han WU Yanping MEI Xiaoqiang LI Weifen*

(*Key Laboratory of Molecular Animal Nutrition of Ministry of Education, Institute of Feed Science, College of Animal Science, Zhejiang University, Hangzhou* 310058, *China*)

Abstract: Probiotics are live microorganisms that provide health benefits to the host by improving the intestinal microecological balance, which have been widely used in livestock production as a feed additive. Not only can probiotics promote the ability of gastrointestinal tract for digesting and absorbing, and thus, improve performance of animals, but also can regulate host metabolism and prevent metabolic diseases of livestocks efficiently. This review provided an update on probiotic effects on digestion, absorption and liver metabolism of nutrients in order to provide theoratical evidence for application of probiotics in animal production.

Key words: probiotics; intestinal; liver; digestion and absorption; metabolism

*Corresponding author, professor, E-mail: wfli@zju.edu.cn (责任编辑 田艳明)